

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL

Climate change impacts on coastal areas

Teresa Bardají (1); Caridad Zazo, Ana Cabero (2); Cristino José Dabrio (3);
José Luis Goy (4); Javier Lario (5) y Pablo Gabriel Silva (6)

RESUMEN

El litoral es uno de los medios naturales más transformados por la actividad antrópica, ya sea directa o indirectamente. El 40% de la población mundial vive en la franja costera (un 44% en España), por lo que cualquier alteración del medio natural se convierte en un gran riesgo.

Desde la segunda mitad del s.XX, el balance sedimentario ha ido presentando, en general, una tendencia progresivamente negativa debido a actividades humanas, incrementándose los problemas relacionados con la erosión y retroceso costero, a menudo confundidos con una subida del nivel del mar. En los últimos años existe una creciente tendencia a dramatizar sobre el futuro de nuestro litoral, no solo español sino global, a punto de desaparecer por la subida generalizada del nivel del mar que va a arrasar gran parte de los terrenos costeros.

Nuestro litoral está enfermo pero para poder entender cuál es el peligro real frente al cambio climático, es necesario entender bien cuál es la problemática concreta de cada sector, es decir cómo es el balance sedimentario real, cuáles son las causas de los posibles desequilibrios, cuál ha sido la tendencia del nivel del mar en un pasado cercano, y sobre todo saber si un determinado sector podría o no adaptarse de forma natural a una subida del nivel del mar, etc. Es decir, tenemos que conocer antes que juzgar.

ABSTRACT

The littoral fringe is a one of the natural environments more highly transformed by human activities, either direct or indirectly. The 40% of world population lives at the coastal area (40% in Spain), so any alteration of this environment becomes seriously risky.

Since the second half of 20th century, sedimentary balance present a progressively higher negative trend mainly due to human activities, with a consequent increasing erosion and coastal retreat, in many cases reported as sea level rise. A wide trend to dramatize has arisen these last decades about what is going to happen with the littoral all over the world, with a wide flooding causing the disappearance of all terrains by the sea.

Our littoral is ill, but if we want to know which the real illness is and how should we proceed, first we have to know the real problem in each considered site. We should analyse the sedimentary balance for each location in danger, the causes of the disequilibria, the sea level trend during in a near past, and above all, the adaptation capacity to a sea level rise. We should know before giving a diagnostic.

Palabras clave: *Dinámica litoral, cambio climático, morfología costera, nivel del mar.*

Keywords: *Coastal processes, climate change, coastal geomorphology, sea level.*

INTRODUCCIÓN

La zona litoral constituye una zona con un equilibrio dinámico especialmente crítico y sensible a cualquier alteración. Las diferentes entradas y salidas de sedimentos conforman un balance sedimentario, totalmente controlado y dirigido por los agentes de la dinámica litoral que actúan en cada sector. A su vez, la tipología de la costa, también está condicionada por esta dinámica litoral, además de por la litología y geomorfología concretas de cada sector.

Para poder evaluar los efectos reales que cualquier alteración de este sistema dinámico pudiese tener en el litoral, debemos conocer y entender los parámetros concretos que condicionan el funcionamiento actual en cada sector y su evolución en el pasado reciente, sin extrapolar causas y consecuencias de una zona a otra. En este sentido hay que hacer una llamada de atención sobre los informes editados por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climatic Change) en los últimos años, ya que sólo pueden tomarse como una referencia genérica sin asumirlos como globales y fijos.

(1) Departamento de Geología, Edificio Ciencias, Universidad de Alcalá. 28871-Alcalá de Henares. teresa.bardaji@uah.es

(2) Departamento de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC. José Gutiérrez Abascal, 2, 28006-Madrid.

(3) Departamento de Estratigrafía-UCM and Instituto de Geología Económica-CSIC, Universidad Complutense, 28040-Madrid.

(4) Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, 37008- Salamanca.

(5) Departamento de Ciencias Analíticas, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Educación a Distancia. 28040-Madrid.

(6) Departamento de Geología, Universidad de Salamanca. Escuela Politécnica Superior de Ávila, 05003-Ávila.

Dinámica litoral

Los factores que condicionan la dinámica litoral en cada sector son: vientos dominantes, oleaje, corrientes litorales y mareas.

Los vientos dominantes tienen una gran importancia ya que son ellos los que condicionan la dirección del oleaje así como las corrientes litorales, y como consecuencia, el transporte de sedimentos. El viento al incidir sobre la superficie del mar inicia el movimiento orbital de las partículas de agua, el diámetro de estas órbitas depende de la fuerza del viento, y es el que determina a su vez la altura y longitud de onda del oleaje (Figura 1). El diámetro de estos movimientos orbitales disminuye en profundidad hasta que desaparece, esa profundidad a la cual deja de haber movimiento y por lo tanto trabajo geomorfológico del oleaje sobre el fondo, es lo que se conoce como nivel de base del oleaje y equivale a la mitad de la longitud de onda. La extensión de la zona sublitoral sometida a la acción del oleaje depende a su vez de la pendiente de este tramo sublitoral (Figura 1).

Cuando los vientos dominantes son oblicuos a la línea de costa, se genera una corriente paralela a la costa que se denomina corriente de deriva litoral y es la responsable del transporte longitudinal de sedimentos, cualquier obstáculo a este transporte, ya sea natural o de origen antrópico, como por ejemplo la construcción de un puerto, desencadena rápidamente un desequilibrio en el balance sedimentario, que se traduce en el desarrollo de procesos erosivos aguas abajo de dicho obstáculo (Figura 2).

Las mareas astronómicas influyen fundamentalmente por el hecho de que hay un sector del litoral que alternativamente está afectado o no por el oleaje. En España, todo el litoral atlántico y cantábrico tiene un rango mesomareal ($\leq 2\text{m}$) aunque puede llegar hasta 4m en mareas vivas (Cendrero *et al.*, 2005). La costa mediterránea presenta un rango micromareal, con unas mareas astronómicas prácticamente imperceptibles estimadas entre 8 y 10cm (Dabrio y Polo, 1987). No obstante, estas mareas meteorológicas pueden tener una gran importancia

en los procesos erosivos del litoral. En situaciones de bajas presiones, de mal tiempo, el nivel del mar sometido a una menor presión, tiende a subir. En el litoral mediterráneo peninsular, esta subida puede alcanzar entre 1 y $1,5\text{m}$ durante temporales (Sánchez Arcilla y Jiménez, 1994).

Cuando coinciden mareas altas astronómicas con mareas meteorológicas ligadas a temporales, y mucho peor si las mareas astronómicas son mareas



Fig. 2. Impacto que ha supuesto la construcción del puerto de Garrucha (Almería) en la dinámica litoral y en la distribución de zonas de acreción y erosión. La foto corresponde al vuelo de 1957 (vuelo americano). Se observa sedimentación y avance de la línea de costa aguas arriba del puerto, mientras que aguas abajo la falta de los sedimentos que han quedado retenidos previamente, provoca la erosión y retroceso.

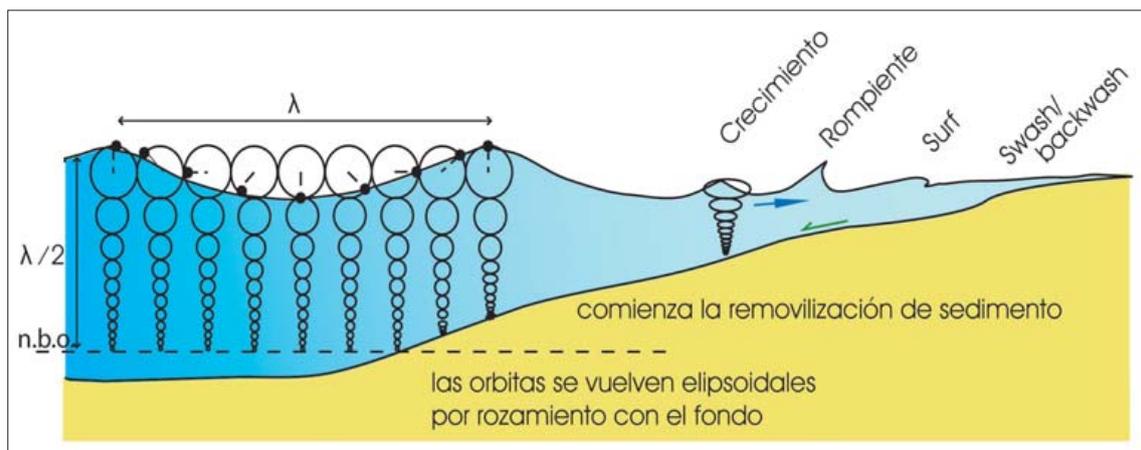


Fig. 1. Movimiento orbital de las partículas de agua que generan el movimiento de las olas. Al llegar a menor profundidad (n.b.o.= nivel del base del oleaje), estas órbitas se vuelven elipsoidales, hasta que sólo suponen un movimiento de vaivén.

vivas, el efecto erosivo sobre la costa puede ser devastador (Figura 3).



Fig. 3. Efecto de la erosión producida por el oleaje de tormenta coincidente con marea viva alta en la playa de Oyambre (Semana Santa, 2008; foto M. García).

El efecto erosivo del oleaje de tormenta durante los temporales forma parte del equilibrio anual de las playas que alternan su perfil de verano (altas presiones atmosféricas, nivel del mar bajo, poco viento, baja altura del oleaje), con el perfil de invierno (bajas presiones atmosféricas, nivel del mar más alto, mayor altura del oleaje y mayor profundidad del nivel de base), (Figura 4). Durante el verano predomina la progradación de la playa con acumulación de sedimentos, y durante las épocas de mal tiempo, una ligera subida del nivel del mar unida a una mayor energía por parte del oleaje favorecen la erosión de la parte más alta de la playa de forma que esos sedimentos pasan a una zona sublitoral más profunda y luego sirven de alimentación a la propia playa durante épocas de buen tiempo.

Balance sedimentario

El equilibrio sedimentario en el litoral se basa en el mantenimiento de una serie de entradas y salidas de sedimentos, de manera que la alteración de cualquiera de éstas puede tener efectos irreparables en la costa.

En cualquier sector litoral (Figura 5) podemos definir las siguientes entradas de sedimentos:

- 1) Aportes procedentes de los ríos
- 2) Aportes procedentes de la erosión de acantilados
- 3) Aportes procedentes del intercambio duna-playa por acción del viento
- 4) Aportes procedentes de la erosión de la playa durante temporales
- 5) Aportes procedentes de la deriva litoral

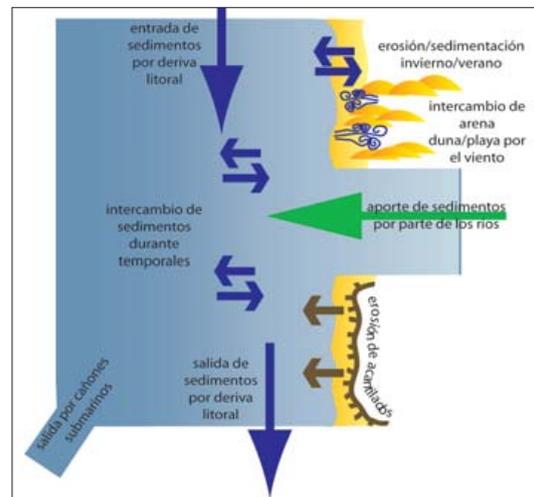


Fig. 5. Esquema representativo del balance sedimentario en el litoral (modificado de Shelby, 1986).



Fig. 4. Comparación entre los perfiles de verano, con baja altura del oleaje y menor energía, y de invierno, con mayor altura de oleaje y mayor energía. A la derecha imágenes de la Manga del Mar Menor correspondientes a la playa en situación anticiclónica (perfil de verano) y de borrasca (perfil de invierno).

A la vista de estas variables es obvio que todas ellas están totalmente transformadas en la actualidad por la actividad antrópica, aunque también debemos considerar que todas estas variables pueden ser a su vez alteradas por un cambio climático.

Los ríos constituyen la principal fuente de sedimentos a la costa. La regulación de prácticamente todos los ríos principales de la Península Ibérica, tanto con fines de abastecimiento como de prevención de riesgos de inundación en zonas del interior, ha supuesto una gran pérdida de aporte sedimentario al litoral. Si atendemos a los datos de regulación de los caudales líquidos de los ríos principales (Tabla 1), nos podemos dar cuenta del alto grado de regulación que presentan. La relación entre caudal líquido y caudal sólido no es una relación lineal, y no es fácil de evaluar con exactitud (Cendrero *et al.*, 2005), pero sí nos puede servir para visualizar la falta de sedimentos que acarrea esta regulación. Hay que tener en cuenta que la descarga sólida que más influye en el sector litoral, es la fracción arena o superior, transportada como carga de fondo que es muy difícil de cuantificar (Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1997), mientras que las partículas más finas no son estables por lo general en el sector litoral.

Muchos de los acantilados blandos, generadores de sedimentos, están siendo estabilizados para proteger los terrenos situados por encima de ellos (Figura 6a); la mayor parte de las playas no conserva su zona más alta o su cordón dunar asociado debido en muchos casos a la construcción de un paseo marítimo o una carretera, de manera que les es más difícil su recuperación tras los temporales (Figura 6b); la construcción de diques de protección o puertos impide el transporte normal y natural de sedimentos por deriva litoral. Como conclusión tenemos que la mayor parte de las playas, se encuentran en retroceso por la falta de sedimentos y tienen que emprender obras de defensa de un tipo u otro (Figura 6c).

| Río o cuenca | Descarga (Hm ³ /año) | Regulado (%) |
|---------------------|---------------------------------|--------------|
| Cuencas Catalanas | 1115 | 72 |
| Ebro | 12998 | 71 |
| Júcar | 1985 | 77 |
| Segura | 725 | 85 |
| Sur | 504 | 47 |
| Barbate + Guadalete | 842 | 44 |
| Guadalquivir | 7230 | 26 |
| Tinto-Odiel | 630 | — |
| Guadiana | 2525 | 75 |

Tabla 1. Caudales líquidos de los ríos que vierten en el litoral (Cendrero *et al.*, 2005)

Tipología de costas

En un estudio reciente sobre los Impactos del Cambio Climático en España, Cendrero *et al.*,

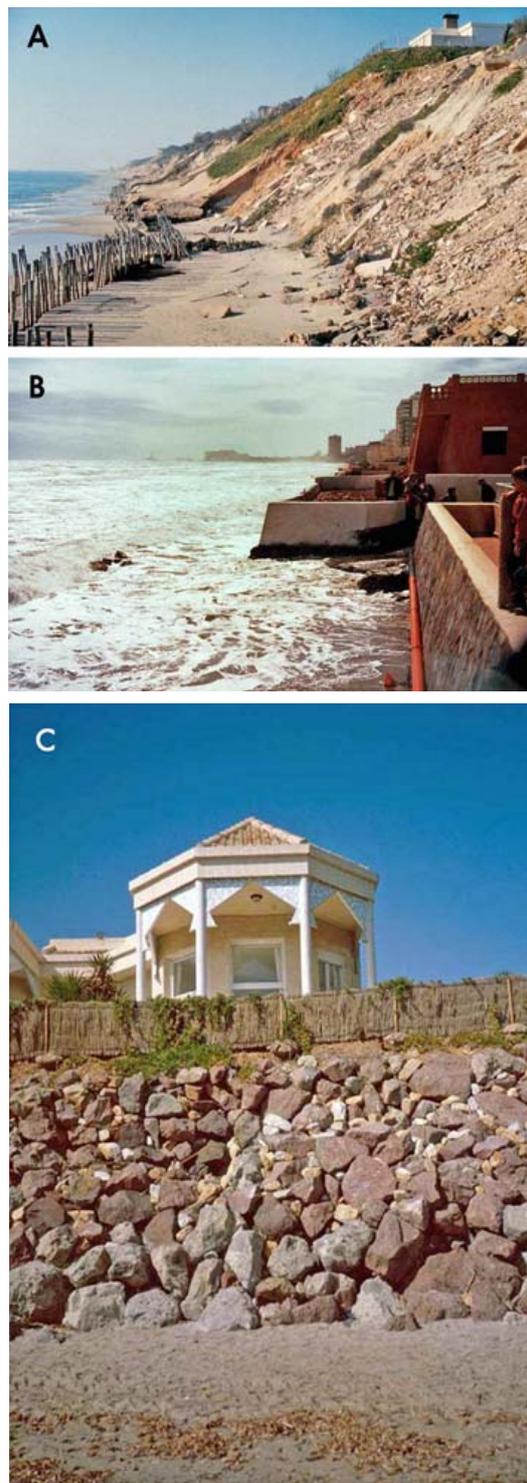


Fig. 6. Ejemplos de actuaciones sobre el litoral. A) Intento de estabilización del acantilado en la zona de Mazagón; B) Ocupación del litoral con construcciones en la misma playa (La Manga del Mar Menor); C) Escollera de protección en zonas de retroceso costero en La Manga del Mar Menor.

(2005) clasifican las costas en función de su mayor o menor vulnerabilidad ante los potenciales impactos derivados del cambio climático. Esta vulnerabilidad está ligada a las características concretas de cada sector, identificados como grandes “unidades ambientales”, y distinguiéndose los siguientes tipos de costa:

Costas bajas asociadas a desembocaduras de cursos de agua

Dentro de este tipo de costas distinguimos en primer lugar *estuarios, bahías y rías*, caracterizados por constituir entrantes del mar en tierra, de dimensiones variables, donde se suelen desarrollar humedales y amplias zonas intermareales, con playas en el interior o en la entrada. Este tipo de costas se localiza preferentemente en el litoral cantábrico y atlántico de nuestra península.

En segundo lugar están los *deltas*, que se desarrollan cuando la carga sólida del río es mayor que la capacidad del oleaje o las corrientes para redistribuirlos. Las características geomorfológicas y climáticas impiden el desarrollo de este tipo de unidades en las costas del norte de la península, siendo exclusivos de la costa mediterránea, con el Delta del Ebro como principal exponente.

Ambos tipos de costas son de un alto impacto potencial ante cualquier cambio ambiental o climático.

Costas bajas con humedales (marismas) y lagunas costeras.

En general las marismas están asociadas a la desembocadura de grandes ríos formando parte de la llanura mareal estuarina, que en estos casos queda aislada del mar por flechas litorales. Aunque las podemos encontrar a lo largo de todo el litoral español, son muy características del litoral SW, en todo el Golfo de Cádiz, donde una marcada deriva litoral hacia el E-SE favorece el crecimiento de estas flechas litorales en la desembocaduras de los ríos Guadiana, Piedras, Tinto-Odiel y Guadalquivir.

Por otro lado, muchas de las lagunas costeras están asociadas a depresiones, en general de origen tectónico, en las que crecimiento de flechas litorales que se inician en el sector levantado y que crecen a favor de la deriva litoral, favorecen su cierre y aislamiento. Ejemplos de estas lagunas las tenemos a lo largo de todo el litoral mediterráneo peninsular.

Playas

La presencia de playas es la mejor forma de protección de un sector litoral concreto, ya que constituyen unidades morfosedimentarias muy dinámicas donde estacionalmente alternan erosión y sedimentación. Podemos diferenciar entre *playas confinadas*, cuando se encuentran limitadas por un acantilado en su parte interna, o por cabos rocosos en sus laterales; y *playas no confinadas* cuando son adyacentes a costas bajas de manera que tienen posibilidades de desplazarse hacia el interior, y en el caso de que la disponibilidad de sedimentos y el

viento lo permita, pueden estar asociadas a campos de dunas.

Ambos tipos se encuentran ampliamente representadas a lo largo de todo nuestro litoral.

Acantilados

Los acantilados se diferencian en función de su dureza y por tanto en función de su vulnerabilidad ante la erosión. Los acantilados duros están formados por rocas compactas resistentes a la erosión, son zonas que no presentan problemas significativos en cuanto a su mayor o menor vulnerabilidad. Por el contrario los acantilados blandos, constituidos por materiales poco coherentes fácilmente erosionables, presentan importantes tasas de retroceso de orden decimétrico o superiores (Figura 7).



Fig. 7. Acantilado blando con retroceso en el Algarve (Portugal).

En el litoral Norte y Noroeste, así como en el Sur y en ciertas partes del litoral mediterráneo predominan los acantilados duros, mientras que los acantilados blandos predominan en el Suroeste peninsular y algunos sectores del Mediterráneo y del Cantábrico.

COSTA ACTUAL: ESTADO DE REFERENCIA

La respuesta del litoral ante un futuro cambio climático, debe analizarse a partir del conocimiento de la situación actual, de sus debilidades, así como de su evolución en un pasado reciente, ya que si no se establece un estado de referencia no podemos establecer comparaciones.

A la hora de analizar la situación actual es obvio que debemos emprender este análisis por sectores o regiones, con características dinámicas y geomorfológicas diferentes.

Costa SW Peninsular: El Golfo de Cádiz.

En general este sector muestra una tendencia general a la progradación registrada en sistemas de flechas litorales a lo largo de los últimos 7.000 años (Zazo *et al.*, 1994, Dabrio *et al.*, 1996), continuándose a lo largo de las últimas décadas (Rodríguez

Ramírez *et al.*, 2000). Las llanuras mareales que alcanzaron su máximo desarrollo hace 2.400 años BP (Dabrio *et al.*, 2000) tienden por su parte a desaparecer debido a un incremento de las tasas de progradación costera y acreción vertical de las unidades sedimentarias en el interior de los estuarios.

La progradación de las flechas litorales en la desembocadura de los grandes ríos se ha visto favorecida por el gran aporte sedimentario proporcionado por los mismos, paralelamente aguas abajo de la deriva litoral, que en este sector se dirige hacia el E-SE, se produce erosión y retroceso costero como consecuencia del déficit sedimentario generado por la retención de sedimentos en las flechas litorales (Figura 8). Este proceso natural se ha visto a su vez acrecentado en las últimas décadas por la construcción de diques, puertos y obras de defensa costera como espigones, rompeolas y/o malecones. Prueba

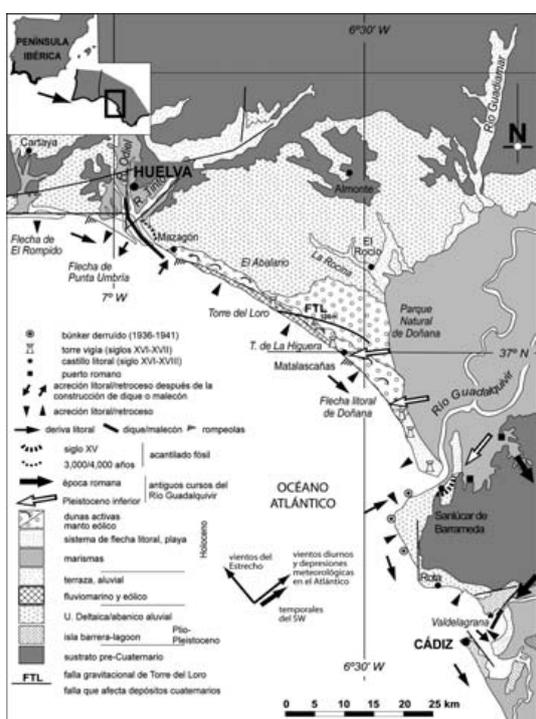


Fig. 8. Esquema morfoodinámico del Golfo de Cádiz (Modificado de Zazo *et al.*, 1987).

de este retroceso son las numerosas Torres vigía del s.XVI-s.XVII y búnkeres de la guerra civil que actualmente se encuentran en el mar (Figura 9). En la actualidad esta tendencia parece haberse acelerado debido a la construcción de diques, espigones y puertos que alteran la dinámica litoral así como al menor aporte de los ríos en su mayoría regulados (Del Río *et al.*, 2002).

Costa Mediterránea

En toda la zona mediterránea, el gran desarrollo turístico experimentado desde la década de los 60 ha desencadenado un enorme desequilibrio en las playas, que han visto muy reducido el intercambio sedimentario invierno-verano, playa –duna, debido a la fijación de los sistemas dunares y edificación en la parte trasera de las playas. En algunos casos en que el retroceso pone en peligro las edificaciones más cercanas a la playa, se han aplicado revestimientos (p.ej. en algún punto de la Manga del Mar Menor) que rompen totalmente el equilibrio dinámico, impidiendo la erosión de la zona más alta de la playa en momentos de tormenta y aumentando la reflexión, lo que favorece a su vez la erosión de la barra sublitoral, frenándose, por tanto, la posibilidad de regeneración natural (Figura 10). La construcción de puertos impide el transporte de sedimentos por deriva litoral, con la consiguiente erosión de la franja costera. En algunos casos, ha supuesto la erosión de los



Fig. 10. Revestimiento de la parte alta de la playa en el sector central de La Manga del Mar Menor (Murcia).



Fig. 9. Ejemplos de retroceso activo de la costa en el Golfo de Cádiz. A la izquierda Torre del Loro, W de Matalascañas; y a la derecha búnker de la Guerra Civil Española entre Sanlúcar y Chipiona.

cordones litorales que cierran humedales costeros, como es el caso de la restinga de la Albufera de Valencia, entre Valencia y Cullera, como consecuencia de la construcción del puerto o el cordón de cierre de la laguna de Santa Pola por el Puerto de Santa Pola.

Por otra parte, la gran regulación que sufren los ríos también ha desencadenado una drástica reducción de los aportes sólidos en todo el área mediterránea, siendo uno de los casos más llamativos el Delta del río Ebro (Sánchez-Arcilla *et al.*, 1998), especialmente vulnerable por tanto, ante cualquier cambio futuro.

También hay que tener en cuenta que, en la mayoría de las playas en las que la elevada presión urbanística ha llevado a la destrucción de los cordones dunares y zonas traseras de la playa, eliminando así esa reserva natural de arena, los propios edificios suponen también una amenaza por sí mismos. En zonas, como p.ej. La Manga del Mar Menor, en que la acción del viento es muy intensa, los edificios impiden la libre circulación del mismo, confinándolo a estrechos corredores que aumentan la erosión en la playa en la que desembocan, facilitando así la entrada del mar durante momentos de tormenta (Figura 11).



Fig. 11. Efecto del oleaje de tormenta sobre la playa. La entrada del mar se ve favorecida por la existencia de los corredores de deflación generados entre los edificios. (La Manga del Mar Menor, Murcia).

Costas del Norte y Noroeste Peninsular

La situación en las costas cantábricas y gallegas es diferente, dado que los ríos en general son más cortos y muy poco regularizados, por lo que prácticamente no sufren esa drástica reducción de caudal, tanto líquido como sólido, en comparación con el resto de los ríos de la península. Cendrero *et al.* (2005) resumen los resultados de diferentes trabajos llevados a cabo en estas costas, indicando que en general se observa una tendencia al incremento en los aportes de sedimentos en tiempos recientes, probablemente como consecuencia de aportes antrópicos, aunque también observan retrocesos perceptibles de playas y frentes dunares o erosión acelerada en acantilados blandos.

IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL

Una vez vista la situación de la costa actual, y la problemática concreta del litoral en cuanto a dinámica litoral y factores que intervienen en el equilibrio dinámico y en el balance sedimentario, es más fácil analizar cuál puede ser la respuesta ante los cambios esperables relacionados con un cambio climático.

Como hemos visto, el equilibrio en el litoral está relacionado con procesos que se originan en el interior, en las cuencas fluviales, y con procesos propios de la zona costera. Por tanto, debemos analizar qué parámetros pueden verse alterados por un cambio climático futuro en los dos ámbitos (Cendrero *et al.*, 2005). En las cuencas fluviales podemos esperar tener cambios en la cobertura vegetal, en los usos del suelo, en la producción de sedimentos, en el régimen de precipitaciones, etc. En el ámbito puramente marino, los cambios esperables están relacionados con cambios en la dirección de los vientos dominantes y oleaje, intensidad y frecuencia de temporales, cambios relativos del nivel del mar, etc. La suma de todos estos parámetros influirá de manera diferente en cada sector litoral en función de la situación actual de la que partamos.

Tenemos, además, que tener en cuenta que a la magnitud de las variaciones esperables en estos factores, hay que sumar los efectos que pueden haber tenido las actividades humanas.

Cambios del nivel del mar: variables y componentes

El nivel del mar actual no es un nivel fijo, estable, sino que es un nivel dinámico afectado por diferentes componentes que funcionan con diferentes escalas temporales y espaciales. En España tomamos como nivel de referencia el nivel medio del mar medido en Alicante. Las tres componentes que pueden afectar a la variabilidad en la vertical del nivel del mar (Cendrero *et al.*, 2005), son las variaciones periódicas ligadas a las mareas astronómicas; las variaciones no periódicas ligadas a las mareas meteorológicas y las variaciones de mayor periodo asociadas a los cambios relativos tierra-mar.

Las mareas astronómicas como ya vimos, pueden tener un papel importante en las costas meso- y macromareales del litoral atlántico peninsular, pero en las costas mediterráneas su efecto es prácticamente despreciable.

Las mareas meteorológicas son el resultado de la suma de dos componentes, el componente barométrico y el efecto de los vientos tangenciales. Estas mareas pueden alcanzar valores de 1m, con un período de retorno de unos 10 años, hasta 1,5 m con períodos de retorno en torno a 100 años (Sánchez-Arcilla y Jiménez, 1994). Si se suma un posible ascenso del nivel del mar estos períodos de retorno se reducen notablemente de forma que para un ascenso de 0,46m, el período de retorno de las mareas

meteorológicas de 1,5m pasa de ser de unos 100 años a tan solo 9 años en el Delta del Ebro (Sánchez-Arcilla y Jiménez, 1994).

En cuanto a la tercera variable, el nivel relativo tierra-mar, implica la relación entre los cambios del nivel del mar propiamente dichos (cambios eustáticos) y los movimientos verticales de la tierra. En los cambios del nivel del mar, tanto pasados como futuros influyen muchas variables que hacen que no podamos hablar nunca de cambios absolutos sino de cambios relativos del nivel del mar. En primer lugar tenemos los cambios producidos por cambios en el volumen de agua, es decir los que se generan como consecuencia de la fusión del hielo de casquetes o de glaciares de montaña, a lo que llamamos *glacioeustasia*. Por otro lado también hay que tener en cuenta aquéllos cambios que pueden haberse producido como consecuencia de deformaciones del geode (superficie equipotencial de las fuerzas de la gravedad y centrífuga) que da lugar a deformaciones importantes en la superficie de los océanos, a lo que llamamos *geoeustasia* (Mörner, 1976). (Figura 12).

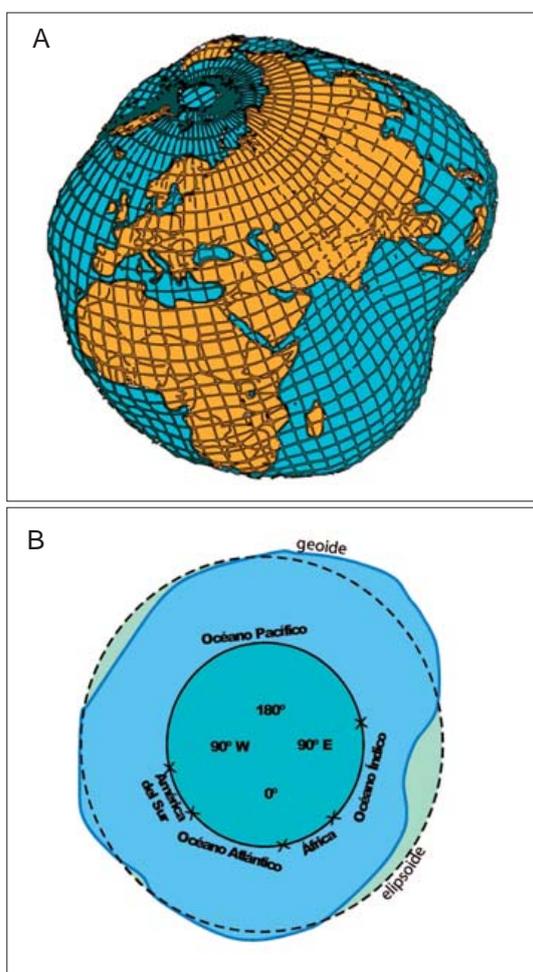


Fig. 12. Esquema del geode actual según una visión general con la escala vertical muy exagerada para una mejor visualización (A) y sección ecuatorial (B) donde se puede ver la diferencia entre la superficie del geode y la del elipsoide de rotación.

También dentro de los movimientos verticales de la tierra podemos distinguir entre aquéllos movimientos locales o regionales, consecuencia de la tectónica regional de cada sector costero, y que inducen cambios en el volumen de la cuenca (tectoeustasia), y aquéllos movimientos verticales que se generan como consecuencia de reajustes *isostáticos*. Estos últimos pueden ser consecuencia de la desaparición de importantes espesores de hielo, como ocurre en Escandinavia a partir de la última glaciación, o pueden ser por variaciones en la columna de agua, es decir tras la deglaciación, la mayor cantidad de agua en los océanos implica una diferencia de carga y por lo tanto se hace necesario un reajuste hidroisostático. También se han descrito cambios en la velocidad de rotación de la Tierra como otro factor más que puede influir en los cambios del nivel del mar (Mörner, 1996).

A estos componentes condicionados por cambios en el volumen de agua, volumen de la cuenca o distribución de la masa de agua, hay que sumar otra serie de componentes como son los cambios estéricos, producidos por la expansión térmica del agua de los océanos, o los cambios dinámicos, generados a su vez por cambios en la distribución de las grandes corrientes oceánicas.

Todo esto quiere decir que hay que tener mucha precaución a la hora de utilizar valores dados para una zona concreta y extrapolarlos a otra áreas aunque sean cercanas, máxime si se trata de zonas subsidentes, como los deltas, en los que la subida relativa del nivel del mar será lógicamente mayor que en zonas con menor tasa de hundimiento o incluso en elevación. Es necesario por tanto establecer las tendencias concretas de cada sector concreto, en lo que se refiere a cambios relativos tierra-mar en un pasado reciente, para poder extrapolar con un mayor grado de certidumbre lo que pueda ocurrir en un futuro cercano.

Esta elevada cantidad de variables que concurren en los cambios del nivel del mar hace que no podamos fijar con exactitud qué va a ocurrir realmente. Si analizamos los valores dados en el último informe del IPCC 2007 (IPCC, 2008) vemos que la suma de las diferentes componentes de los cambios del nivel del mar, no coincide con los valores observados (a partir de datos de mareógrafos y de satélite), probablemente debido a que no están todas las posibles variables contempladas (Tabla 2). Paralelamente, en esta tabla se observa una disparidad entre los valores estimados para el período completo de observaciones (1961-2003) y los estimados para el período más reciente (1993-2003). Aparentemente parece que ha habido una aceleración en los cambios observados en el período más reciente, aunque esta afirmación debe tomarse con cierta precaución dada la diferente precisión de medidas y de toma de datos que lógicamente existe entre los períodos considerados. Un hecho que sí hay que tener en cuenta es la disparidad entre la subida del nivel del mar estimada mediante la suma de las diferentes componentes consideradas y la subida del nivel del mar observada, bien mediante mareógrafos (1961-

| Subida del Nivel del Mar (mm/año) | | | |
|-----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| Origen | Años 1961-2003 | Años 1993-2003 | Referencia |
| Expansión Térmica | 0,42±0,12 | 1,6±0,5 | Sección 5.5.3 |
| Glaciares y Casquetes | 0,50±0,18 | 0,77±0,22 | Sección 4.5 |
| Groenlandia | 0,05±0,12 | 0,21±0,07 | Sección 4.6.2 |
| Antártida | 0,14±0,41 | 0,21±0,35 | Sección 4.6.2 |
| Suma | 1,1±0,5 | 2,8±0,7 | |
| Observado | 1,8±0,5 | | Sección 5.5.2.1 |
| | | 3,1±0,7 | Sección 5.5.2.2 |
| Diferencia (Observado-Suma) | 0,7±0,7 | 0,3±1,0 | |

Tabla 2. Comparación entre las estimaciones de las diferentes contribuciones a los cambios del nivel del mar entre 1961 y 2003, y 1993-2003, y los cambios reales observados según el informe del IPCC 2007 (IPCC, 2008).

2003) o bien mediante datos altimétricos de satélite (1993-2003; misión TOPEX- Poseidón).

Por último, atendiendo a los sucesivos informes del IPCC, vemos que han establecido diferentes predicciones de subida del mar, que han ido cambiando bastante con el tiempo. Así en su primer informe (1990) establecía una subida del nivel del mar entre 50 y 95 cm para los próximos 100 años; en el siguiente (1998) estos valores se redujeron a 23-49cm, y en el tercer informe (se situaban entre 9 y 88cm. En el último informe elaborado por el IPCC, estos valores vuelven a cambiar, estableciéndose para diferentes escenarios de aumentos de temperatura en función de las emisiones de CO₂ (Tabla 3), y contemplando en el peor de los escenarios una subida de entre 26 y 59 cm.

Oleaje

En el mencionado informe de Cendrero *et al.*, (2005) se hace referencia a un proyecto realizado por la Universidad de Cantabria para la Oficina Española del Cambio Climático y la Dirección General de Costas del Ministerio de Medio Ambiente (Medina *et al.*, 2004) en el que se analizan 44 años de datos (1958-2001) considerando variables meteorológicas y oceanográficas para evaluar los impactos del cambio climático en la costa. Los resultados de este estudio ponen de manifiesto un aumento de la energía del oleaje en la costa cantábrica y galle-

ga, mientras que en la costa mediterránea no se observan cambios relevantes en la energía del oleaje, tan solo algún ligero cambio en la Costa Brava, por su cercanía al Golfo de León, y en Cabo de la Nao. En el Golfo de Cádiz parece que la tendencia es hacia un clima marítimo más suave, con una disminución clara en la energía del oleaje.

A largo plazo aumentarán los temporales en la costa Norte, mientras que en la costa Sur se prevé una disminución energética y giro horario de la dirección predominante del oleaje.

Es importante recalcar que un aumento en la altura del oleaje (aumento también de la profundidad del nivel de base del oleaje), influye sobre todo en la amplitud de la zona inundada, especialmente durante tormentas, así como en el transporte de sedimentos y en la extensión del perfil activo de la playa. La variación en la dirección de aproximación del oleaje a tierra, puede desencadenar a su vez importantes cambios en la dinámica litoral, con redistribución de zonas erosivas. También es importante analizar si un cambio climático va a condicionar no un aumento en la frecuencia e intensidad de las tormentas.

Precipitaciones – Recursos Hídricos

En el último Informe de Síntesis elaborado por el IPCC 2007 (IPCC, 2008) se indica que es muy

| Caso | Cambio de temperatura (°C en 2090-2099 respecto de 1980-1999) ^{a, b} | | Aumento de nivel del mar (m en 2090-2099 respecto de 1980-1999) |
|---|---|--------------------|---|
| | Estimación óptima | Intervalo probable | Intervalo según los modelos Excluidos los cambios dinámicos rápidos futuros del flujo de hielo |
| Concentraciones del año 2000 constantes | 0,6 | 0,3 - 0,9 | No disponible |
| Escenario B1 | 1,8 | 1,1 - 2,9 | 0,18 - 0,38 |
| Escenario A1T | 2,4 | 1,4 - 3,8 | 0,20 - 0,45 |
| Escenario B2 | 2,4 | 1,4 - 3,8 | 0,20 - 0,43 |
| Escenario A1B | 2,8 | 1,7 - 4,4 | 0,21 - 0,48 |
| Escenario A2 | 3,4 | 2,0 - 5,4 | 0,23 - 0,51 |
| Escenario A1FI | 4,0 | 2,4 - 6,4 | 0,26 - 0,59 |

Tabla 3. Aumento del nivel del mar para finales del s.XXI según diferentes escenarios de emisiones (calentamiento), según el informe del IPCC 2007 (IPCC, 2008).

probable que a lo largo del s.XXI se experimente, en general, un aumento en las precipitaciones torrenciales, así como un desplazamiento hacia los polos de las trayectorias de los temporales extratropicales, con los consiguientes cambios en las direcciones predominantes de los vientos, en la precipitación y en la temperatura. Con un grado de confianza alto estas previsiones indican que, hacia mediados del siglo, la escorrentía fluvial anual y la disponibilidad de agua disminuirán en algunas regiones secas en latitudes medias y en los trópicos; y también con un grado de confianza alto, numerosas áreas semiáridas (por ejemplo, la cuenca mediterránea) experimentarán una disminución de sus recursos hídricos por efecto del cambio climático.

Todas estas previsiones tendrían un impacto muy negativo en las costas, provocando un déficit aún más marcado de sedimentos provenientes de los ríos, cuya consecuencia será un incremento en la tendencia erosiva y de retroceso de nuestras costas.

ZONAS MAS VULNERABLES EN LA COSTA PENINSULAR

Una vez analizada la problemática actual de cada sector costero, la dinámica litoral que les afecta y los déficits observados en su balance sedimentario, es fácil sacar conclusiones acerca de cuál sería el impacto de los cambios estimados para el próximo siglo, y cuáles son las zonas de mayor vulnerabilidad, entendiendo como tales aquéllas que más daño pueden sufrir como consecuencia directa o indirecta de los cambios esperables. Es evidente que éstas van a ser la que presenten un menor nivel de tolerancia ante dichos cambios, y que son las que ya tienen problemas de erosión y retroceso costero, con baja o nula capacidad de adaptación al cambio. Tenemos que tener en cuenta que el problema ya está aquí, y ese problema es la falta de sedimentos como consecuencia del cierre de las principales entradas de sedimentos al sistema litoral. Es decir, en condiciones naturales es muy probable que la mayor parte de nuestras costas pudiesen asimilar una subida del nivel del mar de entre 0,18 a 0,56m (según las estimaciones del IPCC de 2007) adaptando su sistema morfodinámico a las nuevas condiciones. Lo que es muy difícil es que este sistema ya dañado sea capaz de asimilar un nuevo cambio, máxime cuando el espacio de adaptación está ocupado y transformado por la actividad antrópica.

Si analizamos el problema según los tipos de costa descritos y según las características de cada zona del litoral peninsular podemos sacar las siguientes conclusiones:

Playas y Costas bajas.

En el área mediterránea la deriva litoral generalizada de Norte a Sur ha favorecido el desarrollo de flechas y cordones litorales que encierran lagunas litorales y humedales. Entre ellas podemos incluir ejemplos como la Albufera de Valencia, la Laguna de Santa Pola o la Manga del Mar Menor. Este tipo

de costas, son las que mayor grado de vulnerabilidad van a presentar dado que en su mayoría, la mayor o menor urbanización de las flechas o cordones litorales que encierran esos humedales están ya sufriendo problemas de retroceso como consecuencia de la falta de sedimentos, urbanización de la parte alta de la playa que no puede actuar más como reserva de arena, eliminación de los sistemas dunares que aseguran la retroalimentación hacia la playa, etc. Un caso extremo es la Manga del Mar Menor (Figura 13), donde la construcción masiva ha generado importantes problemas de erosión que tienen que ser paliados mediante construcción de distintos tipos de obras de defensa y alimentación artificial de la playa periódicamente.

Otro tipo de costa altamente vulnerable son los deltas. En el caso del Delta del Ebro a la marcada reducción de sedimentos consecuencia de los grandes embalses, como el de Mequinenza, se une la debilidad de las unidades desarrolladas en el frente del delta y la baja altitud del mismo. Las flechas litorales del frente del delta son especialmente sensibles a la destrucción por temporales, como de hecho ya ocurre. No obstante en este caso, la vulnerabilidad es mayor en la mitad sur que en la Norte, ya que es hacia este último sector hacia donde parecen dirigirse preferentemente los sedimentos aportados por el Ebro (Figura 14).



Fig. 13. La Manga del Mar Menor. Erosión y retroceso costero como consecuencia de la alteración antrópica de la dinámica litoral. Frente al edificio en primer plano puede verse una pequeña escollera con fines de defensa.



Fig. 14. Vulnerabilidad del delta del Ebro ante episodios de tormentas excepcionales (a: directamente vulnerable; b: indirectamente vulnerable); y como consecuencia de cambios producidos en el transporte de sedimentos (línea continua: baja vulnerabilidad; línea discontinua: mayor vulnerabilidad), (modificado de Cendrero et al., 2005).

En todos estos casos un ascenso del nivel del mar, unido a una mayor escasez de aportes fluviales, un posible aumento en la altura del oleaje y mayor incidencia de tormentas, sería desastroso dada la baja o nula capacidad de adaptación de estos sectores.

En el caso de playas, es interesante el estudio llevado a cabo por Rivas y Cendrero (1995) en las playas de Guipúzcoa, Vizcaya y Cantabria (Tabla 4), en el que se concluye que las playas confinadas, con anchura y pendiente reducida, presentan un mayor grado de vulnerabilidad que las no confinadas, con una mayor extensión transversal (50-100m). Por ejemplo, en el peor de los escenarios establecido por estos autores en Cantabria, una subida del nivel del mar de 1m reduciría las 56 playas censadas en la actualidad a tan solo 3.

No obstante, este estudio no contempla ningún tipo de alimentación de la playa, ya sea natural o artificial. En playas no confinadas, asociadas a campos de dunas, estos mismos autores estiman que la pérdida de superficie sería mucho más reducida.

En el Golfo de Cádiz, los efectos ya sentidos por la falta de sedimentos y sobre todo los derivados de la construcción de puertos y obras de defensa costera, se reflejan en una importante alteración de la dinámica litoral, con acumulación de sedimentos aguas arriba de dichas construcciones que actúan como trampas, y erosión aguas abajo para intentar recuperar el balance sedimentario. Estos problemas se verían agravados ante una hipotética subida del nivel del mar, con un mayor alcance del oleaje durante tormentas.

Estuarios

En general los estuarios y rías del norte y NW de la Península, llevan asociados humedales y amplias zonas intermareales de gran interés ecológico por su elevada productividad y biodiversidad. En estos casos el principal riesgo asociado a un cambio climático, es el derivado de un ascenso del nivel del mar, que anegaría estas zonas bajas. En el caso de que exista una zona baja amplia adyacente, estas zonas se desplazarían hacia el interior a medida que se produce la subida del nivel del mar. En el caso de que se encuentren confinadas y no pueda darse este desplazamiento, es muy probable que estas zonas húmedas desaparezcan o vean muy reducida su extensión. En muchos otros casos, una subida del nivel del mar del rango establecido podría suponer la recuperación como humedales y zonas intermareales de aquellas zonas situadas a altura <0,5m (Cendrero et al., 2005), lo que de hecho es un impacto positivo.

Acantilados blandos

Como en otros tipos de costas, la principal amenaza de los acantilados, sobre todo los acantilados

| | Playas totalmente confinadas | | | | |
|----------------------|------------------------------|---------------|--------|-------------|--------|
| | Actualidad | Ascenso 50 cm | | Ascenso 1 m | |
| Nº playas | 95 | 33 | 35,00% | 8 | 8,40% |
| Guipúzcoa | 17 | 12 | 70,60% | 3 | 17,60% |
| Vizcaya | 22 | 10 | 45,40% | 2 | 9,10% |
| Cantabria | 56 | 11 | 19,60% | 3 | 5,40% |
| Longitud (km) | 45 | 23,60 | 51,90% | 8,70 | 19,26% |
| Guipúzcoa | 9,42 | 6,60 | 70,00% | 1,72 | 18,25% |
| Vizcaya | 9,2 | 5,00 | 53,40% | 0,55 | 6,00% |
| Cantabria | 26,37 | 12,15 | 46,10% | 8,76 | 33,24% |

Tabla 4. Resumen de los probables efectos del ascenso del nivel del mar sobre las playas de Guipúzcoa, Vizcaya y Cantabria (modificado de Rivas y Cendrero, 1995).



Fig. 15. Desembocadura de los ríos Tinto y Odiel. Flecha de Punta Umbría antes de la construcción del dique Juan Carlos I (izquierda) y tras la construcción del mismo (derecha). El océano atlántico a la izquierda y la entrada al estuario a la derecha. La deriva litoral del fondo de la foto hacia el frente (ESE).

blandos, no es el cambio climático sino la alteración de la dinámica litoral producida por la elevadísima presión urbanística. No obstante, en los acantilados actuales que ya presentan tasas significativas de retroceso, los cambios en el clima oceánico y en el nivel del mar podrían agravar bastante la situación (Cendrero *et al.*, 2005).

En las costas de Cantabria y el País Vasco (Rivas y Cendrero, 1995) se han detectado posibles problemas de este tipo puntualmente, como es el caso de la playa de Oyambre en donde estiman una aceleración en las tasas de retroceso desde 1946, alcanzando valores de metros por año en los años 90.

En la Costa del Golfo de Cádiz, más del 50% de la costa está constituida por acantilados blandos, sometidos a intensa erosión, llegando a alcanzar valores de entre 1,25 y 2,2 m/año en el acantilado de Mazagón (Rodríguez-Ramírez, 1998) como consecuencia de la construcción del Dique Juan Carlos I (Figura 15).

ZONAS MÁS VULNERABLES A ESCALA MUNDIAL

Las predicciones de una subida del nivel del mar de casi 1m, tal y como decía el primer informe del IPCC de 1998, para finales del presente siglo, desató las alarmas en todo el mundo, fundamentalmente en aquellas zonas y países cuya altura era de uno pocos metros sobre el nivel actual del mar. Más adelante, en los siguientes informes se vio que estos valores estaban sobreestimados, y que las previsiones no eran tan malas como ya hemos visto en el apartado 3, estas cifras siguen cambiando porque de hecho no se conoce el sistema natural al 100%.

Entre los casos que más han conmocionado a la opinión pública por su alto grado de vulnerabilidad frente a una subida del nivel del mar, son los atolones de los océanos Pacífico e Índico. Hay que tener en cuenta que la vulnerabilidad de estas islas, con una altitud que raramente excede la decena de metros, ante un cambio climático viene dada fundamentalmente por el impacto de una posible subida del nivel del mar y un aumento en la frecuencia e intensidad de las tormentas.

En un estudio relativamente reciente (se analizan los cambios del nivel del mar en este contexto en base a datos de mareógrafos, de 23 estaciones en el Pacífico y 7 en el Índico, desde 1950 a 2001 (no en todas las estaciones el registro es tan extenso),

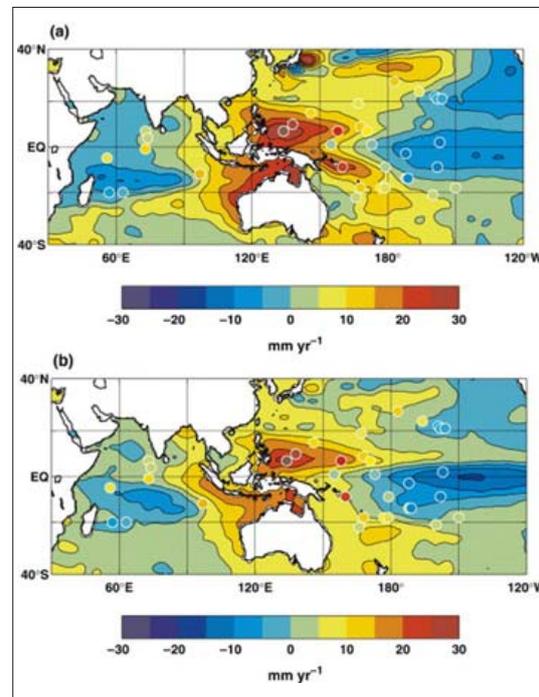


Fig.a 16. Mapa de tendencias del nivel del mar según los datos del TOPEX-Poseidon, y su reconstrucción para el período 1993-2003. (Church *et al.*, 2006).

así como datos altimétricos de satélite TOPEX-Poseidón, para el período 1993-2001. Es de remarcar que estos últimos datos ponen de manifiesto una subida del nivel del mar desde 1993 de cerca de 30mm/año en el Pacífico occidental y en el Índico oriental, mientras que paralelamente se observa una bajada del nivel del mar de alrededor de 10mm/año en el Pacífico oriental y el Índico occidental, lo que según dichos autores parece reflejar la incidencia del fenómeno del Niño durante los primeros años del registro y de la Niña en el 2001 (Figura 16).

En el caso concreto de Tuvalu, hay dos registros de mareógrafos, el primero se extiende desde 1977 y el segundo desde 1993. Los datos muestran divergencias que pueden llegar a alcanzar 0,6 mm/año para estaciones separadas entre sí no más de 2,5km, debido a subsidencias locales, probablemente relacionadas con sobreexplotación de acuíferos. En resumen, los datos obtenidos para Tuvalu, muestran una tasa de subida del nivel del mar de 2 ± 1 mm/año, aunque los autores también indican un posible aumento en la frecuencia de eventos extremos (tormentas) lo que amplificaría más el problema relacionado con la subida del nivel del mar. No todas las opiniones apuntan una subida del nivel del mar en Tuvalu, otros autores (Eschenbach, 2004) muestran su desacuerdo acerca de esta subida. Por otro lado, también hay que tener en cuenta que la máxima altitud de estas islas no llega a 10m, en el caso de la isla de Fongafale (isla capital de Tuvalu) la máxima altitud es de 5m, y corresponde a la altura de un cordón litoral de tormentas, por lo que se hace necesario un conocimiento profundo de la vulnerabilidad real ante una subida del nivel del mar o un mayor impacto de tormentas excepcionales. Tampoco tenemos que olvidar que en concreto esta isla de Fongafale, ha sufrido importantes cambios en el uso del suelo (Figura 17), por lo que esta transformación también repercute en la menor asimilación de unos futuros cambios ambientales (Yamano *et al.*, 2007); según estos autores las islas con una mayor trayectoria histórica de ocupación humana presentan una menor vulnerabilidad que las que han si-

do colonizadas y transformadas más recientemente, como es el caso de Fongafale.

En las Islas Maldivas ocurre lo mismo, hay voces que hablan de una subida de 1mm/año para los últimos 52 años (Church *et al.*, 2007) mientras que otros (Mörner *et al.*, 2004) encuentran evidencias de una bajada del nivel del mar de unos 20-30cm a partir de la década de los 70, inicios de los 80, lo que se traduce en una tasa de bajada del nivel del mar de 7 a 10 mm/año para esos 30 años. Estos valores se alejan mucho de los establecidos en esta zona, por lo que Mörner *et al.* (2004) sugieren que esta bajada represente un cambio eustático regional ceñido al Océano Índico Central. En esta región oceánica, el nivel del mar se encuentra por debajo de la superficie del geode debido a una tasa de evaporación excepcionalmente elevada, un aumento en esta tasa de evaporación provocaría un descenso regional del nivel del mar, que es lo que según estos autores ocurre en las Maldivas.

CONCLUSIONES

El litoral es un medio extremadamente sensible ante cualquier cambio. Los factores que influyen en la estabilidad de cada sector costero son variados y diferentes en función de las características geomorfológicas y climáticas, por lo que se hace necesario estudiar y analizar cada caso concreto par poder determinar cuál es realmente el problema y cuáles son los factores que influyen la mayor o menor vulnerabili-

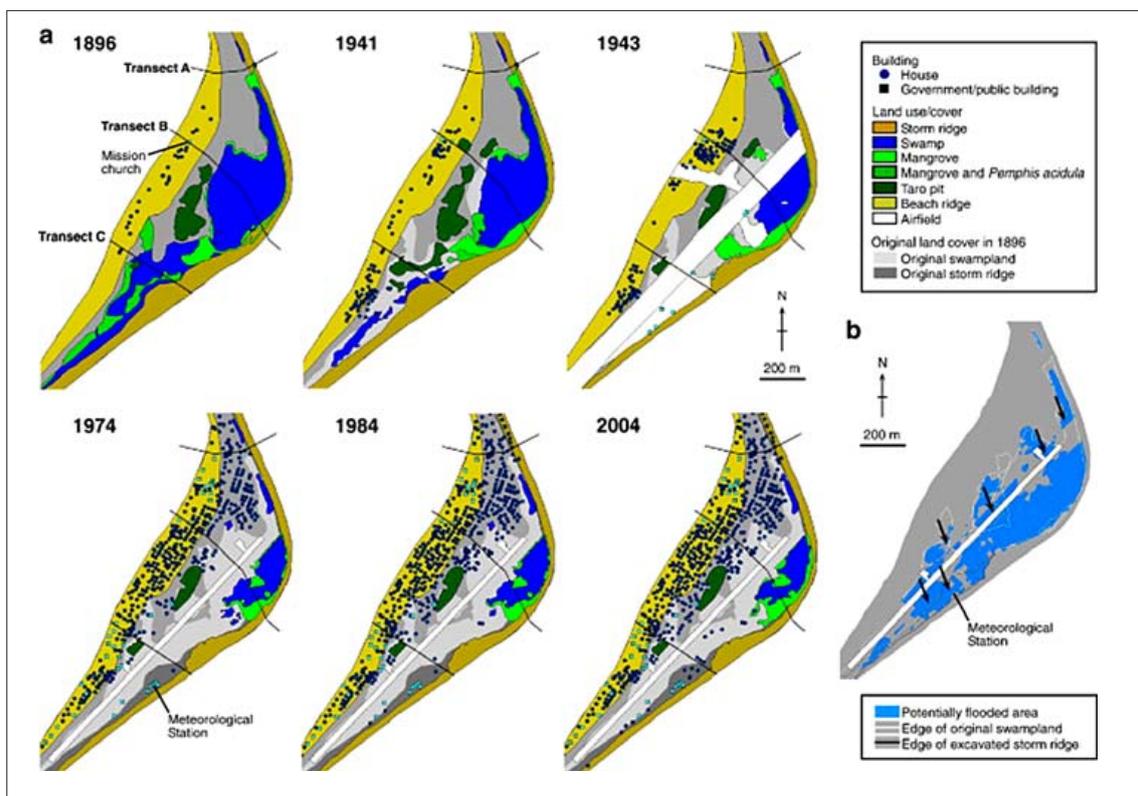


Fig. 17. a) Cambios registrados en los usos del suelo en Fongafale entre 1896 y 2004; b) Distribución de las zonas pantanosas originales con elevaciones <1,35m s.n.m. (Yamano *et al.*, 2007).

dad de cada sector, sin poder extrapolar de unas zonas a otras. Los cambios del nivel del mar por sí solos no son el principal problema, sino la alta ocupación del litoral y la alteración del balance sedimentario, que genera importantes problemas de erosión.

El litoral peninsular español presenta una tipología muy variada de costas con problemáticas muy diferentes, y diferentes grados de vulnerabilidad, por lo que no es posible establecer como principal riesgo ante el cambio climático, los cambios del nivel del mar, sino que hay que tener en cuenta otras muchas variables.

En costas como las islas atolones del Pacífico e Índico, la problemática a su vez es muy diferente, habiendo opiniones diversas acerca de las tendencias del nivel del mar, por lo que tampoco debe emitirse un juicio definitivo acerca de la vulnerabilidad futura, sin haber analizado todos los factores implicados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los Proyectos CGL2008-3998, CGL2008-04000 y GRACCIE-CSD-2007-00067. Así mismo es una contribución al IGCP495 (Quaternary Land Ocean Interactions: Driving Mechanisms and Coastal Responses); al Proyecto 0911-INQUA-CMP (Decoding the Last Interglacial in Western Mediterranean) y Grupo de Trabajo de Paleoclimatología y Cambio Global (UCM 910198).

BIBLIOGRAFÍA

Cendrero, A., Sánchez Arcilla, A., Zazo, C., Bardají, T., Dabrio, C.J., Goy, J.L., Jiménez, C., Mósso, J., Rivas, V., Salas, J.P., Sierra, J.P., Valdemoro, H. (2005). *Impactos sobre las zonas costeras*. En: (Moreno, J.M. Coord.) Evaluación Preliminar Impacto sobre el Cambio Climático en España. Ministerio de Medio Ambiente, España.

Church, J.A., White, N.J., Hunter, R.J. (2006). *Sea-level rise at tropical Pacific and Indian Ocean islands*. *Global and Planetary Change* 53, 155–168

Eschenbach, W., (2004). Tuvalu not experiencing increased sea level rise. *Energy and Environment* 15, 527–543.

Dabrio, C.J., Polo, M.D. (1987). Holocene sea-level changes, coastal dynamics and human impacts in Southern Iberian Peninsula. *Trabajos sobre Neógeno-Cuaternario*, 10, 227-247.

Dabrio, C.J., Zazo, C., Somoza, L., Goy, J.L., Bardají, T., Lario, J., Silva, P.G. (1996). Oscilaciones del nivel del mar de largo y corto plazo: indicadores morfosedimentarios en zonas costeras. *Geogaceta*, 20 (5), 1679-1682.

Dabrio, C.J., Zazo, C., Goy, J.L., Sierro, F.J., Borja, F., Lario, J., González, J.A., Flores, J.A. (2000). Depositional history of estuarine infill during the Late Pleistocene-Holocene postglacial transgression. *Marine Geology*, 162, 381-404.

Del Río, L., Benavente, J., Gracia, F.J., Anfuso, G., Martínez del Pozo, J.A., Domínguez, L., Rodríguez-Ramírez, A., Flores, E., Cáceres, L., López-Aguayo, F., Rodríguez-Vidal, J. (2002). In: *Litoral 2002. The Changing COAST. Eurocoast/EUCC Porto- Portugal* (Ed. EURO-COAST). The quantification of coastal erosion processes in the South Atlantic-Spanish coast: methodology and preliminary results.

IPCC (2001). <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/>

IPCC (2008). *Climate Change 2007*. Cambridge University Press. <http://www.ipcc.ch/>

Jimenez, J.A. y Sanchez-Arcilla, A. (1997). Physical Impacts of Climatic Change on Deltaic Coastal Systems (II): *Driving Terms*. *Climatic Change* 35, pp. 95-118.

Mörner, N.-A. (1976). Eustasy and geoid changes. *J. Geol.* 84,123–151

Mörner, N.A. (1996). Global change and interaction of Earth rotation, ocean circulation and paleo-climate. *Ann. Acad. Bras. Ci.* 68 Suppl. 1, 77–94

Mörner, N.A., Tooley, M., Possnert, G., (2004). New perspectives for the future of the Maldives. *Global and Planetary Change* 40, 177–182.

Rivas, V., Cendrero, A. (1995). Human influence in a low-hazard coastal area: an approach to risk assessment and proposal of mitigation strategies. Coastal Hazards. Perception, Susceptibility and Mitigation. N° especial de *Journal of Coastal Research* 12: 289-298.

Rodríguez-Ramírez, A. (1998). *Geomorfología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Ministerio de Medio Ambiente, 146 pp.

Rodríguez-Ramírez, A., Cáceres, L.M., Rodríguez Vidal, J., Cantano, M. (2000). *Relación entre clima y génesis de crestas/surcos de playa en los últimos cuarenta años (Huelva, Golfo de Cádiz)*. Cuaternario y Geomorfología, 14, 109-113 Sánchez Arcilla y Jiménez, 1994)

Sánchez-Arcilla, A., Jiménez, J.A. y Valdemoro, H. (1998). The Ebro Delta: morphodynamics and vulnerability. *Journal of Coastal Research*, 14 (4), 754-772.

Shelby, M.J., (1985) *Earth's Changing Surface*. Clarendon Press.

Yamano, H., Kayanne, H., Yamaguchi, T., Kuwahara, Y., Yokoki, H., Shimazaki, H., Chikamori, M., (2007). Atoll island vulnerability to flooding and inundation revealed by historical reconstruction: Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu. *Global and Planetary Change* 57, 407–416.

Zazo, C., Dabrio, C.J., Goy, J.L. (1987). *Evolution of the lowlands littorals of Huelva and Cadix (Spain) from the Holocene until now*. European workshop on interrelated bioclimatic and land use changes. 17-21 October 1987, Noordwijkerhout, The Netherlands.

Zazo, C., Goy, J.L., Somoza, L., Dabrio, C.J., Belloumini, G., Improta, S., Lario, J., Bardají, T., Silva, P.G. (1994). Holocene sequence of sea-level fluctuations in relation to climatic trends in the Atlantic-Mediterranean linkage coast. *Journal of Coastal Research*, 10, 933-945. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 24 de abril de 2009 y aceptado definitivamente para su publicación el 13 de octubre de 2009.